Elaboration d'un protocole expérimental en vue de déterminer l'étanchéité à l'air de bâtiments et de parois via les ultrasons.

Ing. N. DURAY
ISICHt -- Mons

Ir. B. MICHAUX
C.S.T.C.

Sur base des techniques conventionnelles de détection et de quantification des inétanchéités du bâtiment, une analyse bibliographique et des tests in situ m'ont permis de relever les défauts de ces techniques auxquels l'utilisation des ultrasons devrait pallier. Sur base d'expériences réalisées au laboratoire du Centre Scientifique et Technique de la Construction, l'impact de différents paramètres sur le déplacement des ultrasons dans une fuite est comparé au débit d'air circulant dans cette fuite. Malgré le cadre restreint des mesures effectuées, un premier protocole a été envisagé pour quantifier les fuites grâce au dispositif ultrasonore.

Mots clés : infiltrométrie, étanchéité, bâtiments, ultrasons, recherches, protocole expérimental.

Based on conventional techniques for the detection and the quantification of leakages in the building, a literature review and field testing allowed me to identify backgrounds and limits of these techniques which ultrasonic tests should palliate. Based on experiments conducted in the laboratory of the Belgian Building Research Institute, the impact of different parameters on the movement of ultrasonic through leaks is compared to the air flow rate for the same leak. Despite the limited measurements, a first protocol was intended to quantify the leakage through the ultrasonic device.

Keywords : blower door test, air tightness, buildings, ultrasound, research, experimental design.

1. Introduction

A l'heure où les maisons « basse énergie » sont omniprésentes dans le milieu de la construction, la réduction des dépenses énergétiques devient primordiale pour chaque construction. Malgré une isolation poussée, le manque d'étanchéité de l'enveloppe est responsable d'un gaspillage d'énergie mais aussi d'un inconfort, d'une infiltration de polluants et d'une modification du sens du flux d'air (responsable de la perturbation des systèmes de ventilation mécanique). Une carence d'étanchéité à l'air facilite la diffusion de vapeur d'eau par convection. Cette diffusion dans la paroi peut engendrer des zones de condensation et in fine des dégradations de ces constructions.

Pour détecter mais aussi quantifier les fuites, plusieurs techniques conventionnelles existent mais chacune présente des inconvénients. Pour contrer ces problèmes, une nouvelle méthode de détection commence à être utilisée. La détection des fuites par ultrasons consiste en un repérage des pics d'intensité (grâce à un capteur) sur une paroi soumise à une onde ultrasonore incidente artificielle (créée par un émetteur). Utilisée surtout dans l'industrie (fuites dans les cales de bateaux, problèmes des réseaux d'air comprimé, étanchéité des voitures, …), cette méthode est surtout attendue par les menuisiers qui ne reçoivent le solde de leur facture qu'à la fin du chantier (le bâtiment devant être terminé pour réaliser un test de pressurisation).

Alors que la détection permet de repérer la position d'une fuite, la quantification permet d'évaluer la gravité de celle-ci. Même si la détection par ultrasons semble possible, le plus gros problème consiste en une quantification des fuites par ultrasons. En effet, les sons et l'air ne réagissent pas de la même manière avec le milieu environnant. La propagation des ondes sonores et l'étanchéité à l'air ne dépendent pas des même contraintes

Pourtant, l'évaluation de la taille de chaque fuite séparément pourrait permettre de juger de son impact sur le débit d'air infiltré et donc la pertinence d'une réparation avant la clôture des travaux. Actuellement, seuls les tests par blower door (donnant une valeur global en fin de construction) et par gaz traceurs (localisés mais complexes) sont utilisables dans cette optique.

Un nouveau protocole expérimental doit donc être établi afin de quantifier les fuites facilement, rapidement, à tout moment du chantier et sans connaissances techniques importantes, grâce aux ultrasons.

2. Tests conventionnels d'étanchéité

Avec l'isolation thermique du bâtiment et l'utilisation d'installations techniques performantes (ventilation doubles flux, chaudières à condensation, …) qui sont primordiales pour assurer une consommation énergétique réduite, l'étanchéité à l'air du bâtiment correspond au troisième critère indispensable pour accroitre les performances énergétique du bâtiment. En effet, les infiltrations d'air causées par des fuites dans l'enveloppe du bâtiment sont responsables d'entrée d'air humide, de pertes thermiques (de 15 à 30% des besoins énergétiques), d'inconfort, …
Plusieurs techniques complémentaires existent afin de quantifier et de détecter ses fuites.

2.1. Test de quantification

Figure 1 : Vue intérieure

Actuellement, le test de quantification le plus utilisé est le test de pressurisation, dit « blower door » (ou test d'infiltrométrie). Défini selon les normes NBN EN 13829 et ISO/DIS 9972, il s'agit d'une mise sous pression du bâtiment afin d'en déterminer principalement le débit d'air d'infiltration.

Figure 2 : Vue extérieure

Durant le test de pressurisation, un autre dispositif de quantification (fig. 3) peut être utilisé pour déterminer le débit d'infiltration pour des fuites de petit diamètre (interrupteur, serrure, bouche de ventilation,…) sous une pression donnée. Cet appareil utilise la méthode de compensation de pression par système mécanique.

Figure 3 : Flow Finder (ACIN)

2.2. Tests de détection

Afin d'améliorer l'étanchéité, un test de quantification s'accompagne souvent d'un test de détection permettant de repérer visuellement la position des fuites.

La caméra thermique (fig. 4) permet de distinguer des zones de rayonnement infrarouge différent, fonction de la chaleur emmagasinée par un corps. Elle associe alors une couleur à une valeur d'intensité du rayonnement IR émis, traduisant en une carte de températures la scène observée. Dans le cas de la détection de fuite, une visualisation des zones froides permet de déterminer les trous dans l'enveloppe du bâtiment.

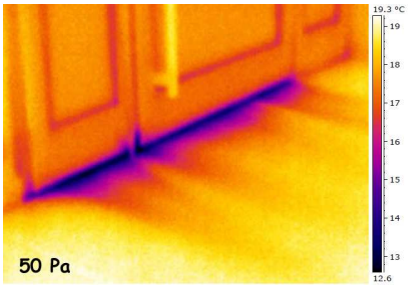

Figure 4 : Caméra thermique [2]

Afin d'observer le passage d'air au travers d'une fuite de l'enveloppe, l'utilisation de fumigènes couplée à un test de pressurisation est majoritairement employée. La fumée peut être produite de deux manières différentes : via des tubes fumigènes (fig. 5) ou via des générateurs de fumées. Ces deux techniques nécessitent un déplacement d'air pour être efficaces.

Figure 5 : Tubes fumigène

Le déplacement d'un anémomètre (fig. 6) sur la surface intérieure de l'enveloppe durant un test de dépression permet de mesurer les déplacements d'air de manière plus précise et objective qu'un test sensoriel.

Figure 6 : Anémomètre [5]

L'utilisation de gaz traceur permet d'obtenir les taux de ventilation et le débit d'air spécifique dans un bâtiment. Cette méthode nécessite un équipement sophistiqué comprenant un dispositif de gestion de l'injection et d'analyse de la concentration du gaz (fig. 7).

Figure 7 : Gaz traceur

2.3. Comparaisons

L'explication des différentes méthodes exposées ci-avant permet de dégager les avantages mais surtout les inconvénients pour lesquelles la détection par ultrasons mériterait d'être étudiée.

Le test de pressurisation permet de quantifier le débit total d'air qui s'infiltre dans le bâtiment. Mais il ne peut être réalisé qu'en fin de chantier. De plus, plusieurs paramètres, tels que les conditions atmosphériques, rentrent en compte durant l'essai.

Si la détection immédiate des zones froides par caméra thermique avantage son utilisation, la différentiation entre pertes d'étanchéité et pertes thermiques nécessite des pré-requis liés au bâtiment étudié.

Les fumigènes permettent de détecter facilement une fuite lors d'une mise sous pression mais ils présentent plusieurs inconvénients : toxicité, débit de fumées, opacité, …

Pour avoir une mesure (malgré tout peu précise) à l'anémomètre, il faut que la vitesse de l'air passant par la fuite soit supérieure, de manière significative, à la vitesse de déplacement de l'air ambiant.

La méthode du gaz traceur permet une quantification à plus petite échelle mais nécessite un certains laps de temps de mesure, une maitrise, …

Aucun des ces tests ne permet de quantifier séparément et précisément chaque fuite. La détection des fuites par ultrasons, déjà mise au point par différentes entreprises, doit donc évoluer vers une quantification des fuites afin de juger, par exemple, de la nécessité d'une réparation.

3. Equipement utilisé

Les instruments de mesure ultrasonore sont déjà employés dans l'industrie. Ils permettent une maintenance prédictive des installations industrielles par contrôle des roulements, du graissage, localisation des décharges électriques, … mais aussi, durant la conception, un contrôle d'étanchéité des cales de bateaux, des vitrages automobiles, des citernes enterrées, …

La détection des fuites est également présente dans le bâtiment. En effet, plusieurs entreprises vendent des kits d'émetteur et de récepteur permettant une détection des défauts des joints de fenêtres, des portes, …

Par contre, la possibilité d'une quantification des fuites sur base du passage d'ultrasons n'avait pas encore été vérifiée. Afin d'obtenir une nouvelle technique de mesure, une nouvelle recherche collective est lancée par le CSTC pour aboutir à un protocole de mesure de l'étanchéité via des ultrasons.

Pour mener à bien cette recherche, le CSTC dispose du kit de détection SDT 200 (fig. 8). Il se compose principalement :

- de deux émetteurs :
  - le SDT 8 : avec ses 8 émetteurs, il permet la production d'ondes en demi-sphère pour une puissance d'émission de 8 x 125mW ;
  - le SDT 200mW : son seul émetteur permet d'orienter l'onde ultrasonore dans une direction bien précise.

  Ils utilisent, tous deux, la technique d'émission bi-sonique à 39,2 et 39,6 kHz.

Figure 8 : Kit SDT 200

- d'un détecteur ultrasonore : équipé d'un capteur interne, il permet de mesurer l'intensité ultrasonore instantanée ou sur une période définie dans la gamme de fréquences [36100 40700] Hz. Sur base de l'intensité moyenne mesurée, il calcule automatiquement (fig. 9) :
  - La valeur efficace « RMS » : valeur continue qui donne la même puissance que le signal alternatif mesuré (valeur de référence pour l'analyse). Elle est calculée tous les quarts de seconde ;

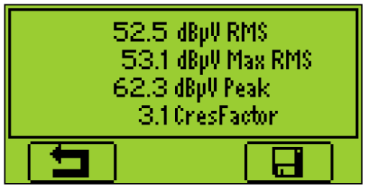

Figure 9 : Valeurs calculées[4]

  - Le maximum des valeurs efficaces calculées « Max RMS » : il permet de savoir si le signal mesuré est stable ;
  - La valeur de crête « Peak » : valeur maximale instantanée mesurée ;
  - Le facteur de crête « CresFactor » : rapport entre le Peak et le RMS, il permet de connaitre l'évolution des problèmes.

4. Expérimentations

4.1. Organigramme général des tests

Comme la quantification des fuites par ultrasons n'a pas encore été étudiée, ma démarche expérimentale s'est basée sur une suite d'expériences visant à déterminer l'impact de différents paramètres sur cette nouvelle méthode de mesure. Au départ de trois tests blower door réalisés in situ, plusieurs hypothèses ont été établies concernant les problèmes et les limites rencontrés. Ils m'ont permis d'établir le cheminement de mon stage afin d'avancer la recherche au maximum. Seules certaines expériences seront expliquées dans cet article.

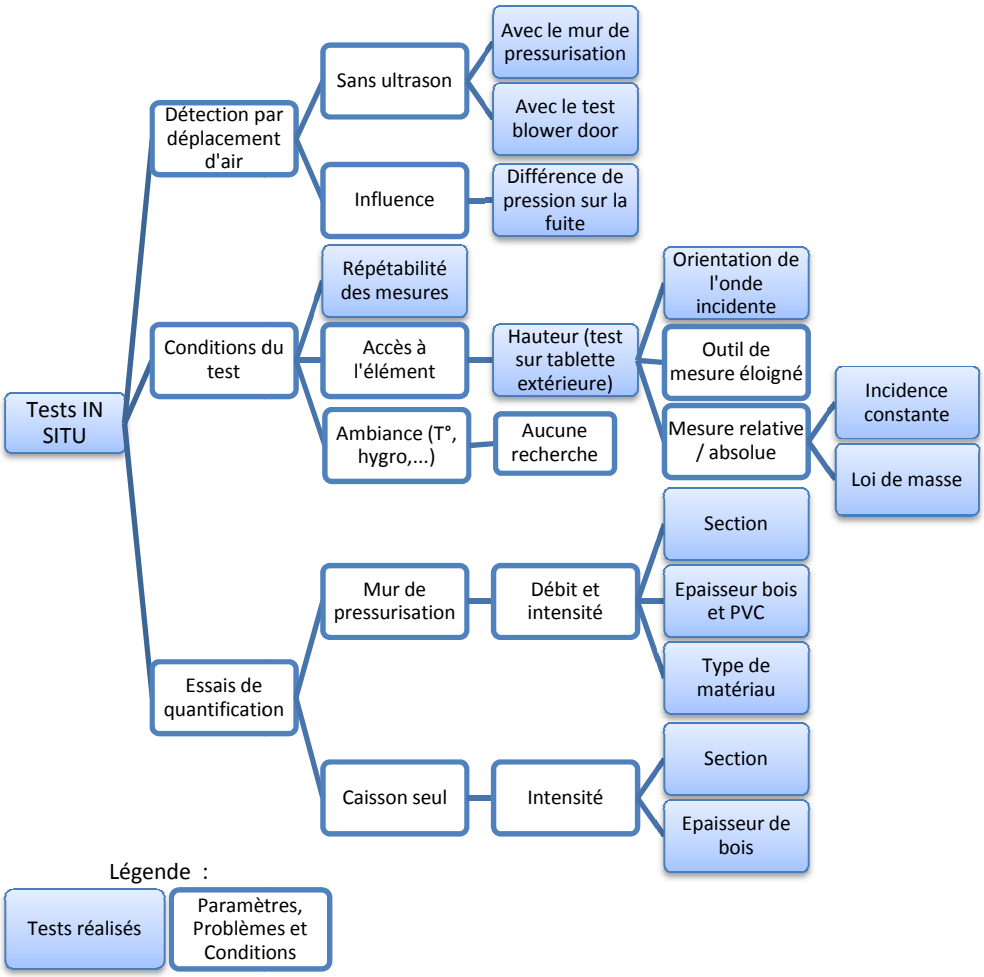

Figure 10 : Organigramme des tests réalisés

4.2. Tests d'infiltrométrie

Pour approuver les recherches concernant les méthodes de détection et de quantification, la participation à un test in situ m'a permis d'en vérifier les avantages et les inconvénients. De plus, sur base des détections traditionnelles de fuites, une vérification par ultrasons permet de repérer les mêmes défauts dans l'enveloppe du bâtiment. Une des maisons expérimentales du CSTC a été testée ainsi que deux halls industriels situés à Stabroek et à Malines.

Le manque d'étanchéité de la maison a permis une détection facile des fuites simples (épaisseur faible, peu d'obstacle : tour de châssis, grille de ventilation, dessous de porte, …) par ultrasons confortée ensuite par fumigène.

Le hall de Stabroek (en voile de béton et panneau sandwich) a permis de tester des fuites plus complexes dans des matériaux de natures différentes. Plusieurs défauts ont été relevés par fumigènes mais aussi par ultrasons (émetteur SDT 8 au centre du hall) : la liaison en silicone entre le dormant et le voile de béton d'une porte en acier, la liaison mécanique entre les panneaux sandwichs posés sur des murets de béton, l'ancrage des voiles de béton entre hangars adjacents, …

Semblable à celui de Stabroek, le hall de Malines sert d'entrepôt pour un grand magasin. Malgré la disposition identique des panneaux de bardage sur un muret en béton, la détection par ultrasons n'a pas été possible. En effet, le renfort dû au voile augmente le parcourt du son et donc son atténuation.

Figure 11 : Vue intérieure

Grâce à ces essais sur site, l'utilisation des ultrasons a permis de relever les premières questions relatives à cette technique :

- La complexité du chemin synonyme d'atténuation trop importante ;
- La caractérisation des fuites linéaires par un capteur « ponctuel » ;
- La quantification d'un regroupement ou d'une séparation de fuites ;
- Certains paramètres tels que le type de matériaux, la position de l'émetteur, les conditions de tests, …

4.3. Conditions du test

Premièrement, maintenir constantes les conditions du test devrait aboutir à des résultats identiques. Communément appelée répétabilité, cet essai prouve la capacité à réaliser un test plusieurs fois tout en obtenant des résultats semblables. Le capteur et l'émetteur utilisés ainsi que leur position ne doivent pas modifier les résultats obtenus. Cette expérience a montré une allure semblable des profils de détection mais avec une différence significative (10dBµV) entre les valeurs mesurées.

Deuxièmement, l'expérience révèle un autre problème dû aux conditions : le changement de position de l'émetteur (intérieure et extérieure) n'est possible que si l'élément à tester est accessible facilement. Si tel n'avait pas été le cas, les fabricants indiquent de déposer l'émetteur sur la tablette extérieure afin de pouvoir réaliser les essais sans danger (fig. 12).

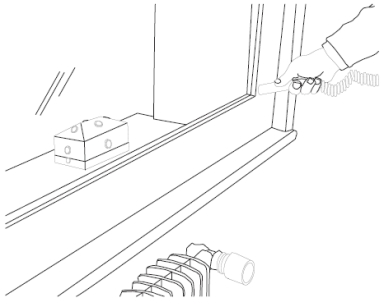

Figure 12 : Emetteur extérieur[3]

Une comparaison des pics (traduisant, normalement, la présence d'une fuite d'air) montre les limites de cette méthode. Une intensité très élevée près de l'émetteur et une onde passante encore importante du côté de la mesure facilement réfléchie par des obstacles (opérateur, détecteur,…) sont les principaux problèmes rencontrés. Une comparaison des valeurs sur l'entièreté de la zone mesurée risque d'induire des conclusions erronées.

Enfin, un autre paramètre, lié aux conditions du test, qui pourrait influencer le passage du son dans une fuite est l'orientation de l'onde incidente. Suivant la position de l'émetteur sur la tablette ou par rapport au trou, l'onde incidente directe aura une direction différente. Un décalage de plus de 10dBµV a été observé pour un même trou entre les mesures sous un angle d'attaque de 18° et de 90°. La réflexion interne, et donc l'atténuation, est donc augmentée. Pour éliminer cet impact, l'utilisation du SDT 8 avec ses huit émetteurs permet d'inonder la pièce d'ondes ultrasonores, réfléchies dans toutes les directions, soumettant chaque fuite à des ondes venant de plusieurs directions aux intensités semblables.

4.4. Atténuation ultrasonore

Intensités incidentes constantes
Pour pouvoir comparer l'intensité des ultrasons passants sans commettre d'erreur, il faut que la surface considérée soit soumise à la même intensité d'émission. Pour cela, il faut placer l'émetteur à une distance telle que l'onde incidente arrivant sur le châssis puisse être considérée comme plane et non circulaire (passage du champ direct au champ réverbérant).
Si l'émetteur est placé à 90cm de la paroi, l'intensité est élevée sur une surface étroite de 80cmx80cm. Logiquement, l'uniformisation de l'intensité croît avec la distance séparant la source du récepteur. Dès 490cm, une zone centrale uniformément étendue peut être repérée. La meilleure solution est donc de placer l'émetteur loin de la surface et centré sur l'élément éprouvé.

Loi de masse
Afin de détecter les défauts d'une paroi, l'incidence égale sur le corps d'épreuve permet de comparer les zones saines des zones poreuses par mesure du côté passant. Mais pour aboutir à une quantification des fuites par ultrasons, la connaissance seule de l'onde passante est insuffisante : le calcul de l'atténuation causée par la fuite permettrait de connaitre ses dimensions et donc son débit d'infiltration sur base d'essais en laboratoire.

Pour mesurer cette atténuation, deux techniques sont possibles. La première consiste en une mesure différentielle de chaque côté de la paroi mais les difficultés du relevé du côté incident compliquent son application sur site. La deuxième technique consiste à mesurer l'intensité passante sur un endroit sain près de la fuite et à lui ajouter l'indice d'affaiblissement acoustique « R », calculé par la loi de masse, pour connaitre l'intensité incidente.

Pour les parois simples, cette loi permet de calculer la valeur de R sur base de la masse surfacique du matériau "m_s" et de l'impédance acoustique de l'air "$\rho * c$" à la fréquence "f" souhaitée :

$$R = 10 * \log\left(\frac{m_s * f}{\rho * c}\right)^2 \quad [dB]$$

Mais cette loi n'est pas vérifiée pour toutes les fréquences. En effet, chaque matériau présente une fréquence critique pour laquelle l'atténuation chute de plusieurs décibels par rapport à la valeur théorique :

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} * \sqrt{\frac{12 * (1 - \nu^2) * m_s}{E * e^3}} \cong 60798\sqrt{\frac{m_s}{E * e^3}} \quad [Hz]$$

Avec : "c" la vitesse du son dans l'air, "ν" le coefficient de Poisson, "m_s" la masse surfacique, "E" le module de Young et "e" l'épaisseur du matériau.

Le calcul de la fréquence critique pour chaque matériau testé par ultrasons permet de savoir si la loi de masse (adaptée aux ultrasons) peut être utilisée sans modification de l'atténuation.

Durant mon stage, j'ai pu relever une série d'atténuation dans différents types de matériaux aux fréquences ultrasonores utilisées par l'émetteur.

Type :	Ép. [mm]	Att. expérimentale [dBµV]	Fréquence critique [Hz]	Att. théorique [dB]
Panneau multiplex	18	51,3	1055,2	61,76
Laine de roche	45	17,1	31890,4	44,4
	90	30,4	15945,2	50,42
	135	37,9	10630,1	53,95
	180	51,9	7972,6	56,44
Panneau mousse PU	80	49,4	8992,1	48,46
Membrane à µ-variable	0,2	25	/	18,09

Figure 13 : Tableau récapitulatif selon le matériau

Sur base des valeurs théoriques, le doublement de l'épaisseur provoque, comme le montre la formule du « R », une augmentation de l'atténuation de 6,02dB (cas de la laine de roche). Par contre, en pratique, un doublement de l'épaisseur provoque une augmentation d'atténuation de 13,3dBµV (de 45 à 90 mm) et de 21,5dBµV (de 90 à180 mm). Ces différences peuvent provenir de la non-homogénéité de la laine de roche, constituée de zones moins denses et donc moins absorbantes.

Dans le cas du panneau en PU, la comparaison des atténuations entre la valeur théorique de 48,46dB et la valeur mesurée par test de 49,4dBµV montre la possibilité d'une utilisation de la loi de masse dans le cas de matériau homogène dont les caractéristiques sont connues.

L'acoustique du bâtiment s'intéresse principalement aux problèmes causés par le son dans la bande de fréquences audibles. Les lois utilisées doivent donc être transposées aux ultrasons.

4.5. Quantification

Grâce au mur de pressurisation, l'expérience visait à déterminer le débit sous 50Pa de différents types de fuites. Pour ces mêmes fuites, la mesure des intensités incidente et passante a permis de calculer l'atténuation causée par cette fuite.

Le mur de pressurisation (fig. 14) permet de déterminer le débit d'air passant au travers d'un élément de façade, d'une membrane, … sous différentes pressions.

Concernant les essais à réaliser pour la quantification, en référence aux normes NBN EN 13829 et ISO/DIS 9972, il convient de déterminer le débit passant au travers une fuite connue sous 50Pa afin d'établir un lien entre ce débit et la perte d'intensité ultrasonore causée par la fuite.

Figure 14 : Mur de pressurisation

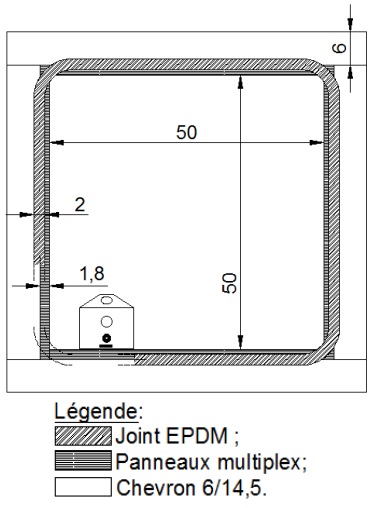

Figure 15 : Plan du caisson

Pour cela, l'utilisation d'un caisson en bois sur lequel des planches peuvent être vissées permet de faire varier facilement la section mais aussi l'épaisseur de la fuite voulue. Pour chaque configuration de trou, le débit sous 50 Pa de pression différentielle s'obtient par régression (comme pour le blower door) d'au moins 5 mesures (Q ; p) via une courbe de tendance de type puissance. Cette régression permet de déterminer les coefficients « c » et « n » selon l'équation : $Q = c * (p)^n$.

Impact de la section sur le débit et l'atténuation

Cette expérience a été réalisée deux fois sur le mur de pressurisation (les 20 et 21 octobre et du 06 au 08 novembre) et le caisson a été utilisé seul pour un relevé d'atténuation.

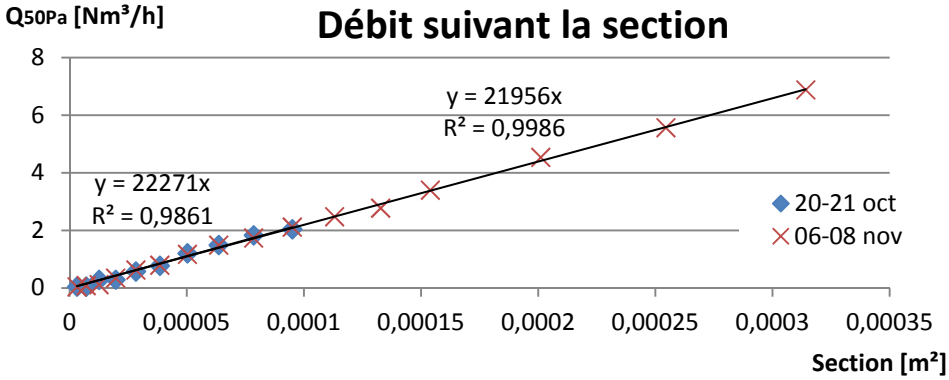

Figure 16 : Graphique du débit suivant la section (Ø2mm → Ø20mm)

Cette droite linéaire traduit bien la relation entre le débit et la section. En effet, le débit volumique passant au travers un diaphragme correspond au produit de la section de passage par la vitesse du fluide.

Essayons d'établir le même type de relation pour l'intensité ultrasonore. Plutôt que de comparer les valeurs passantes mesurées, un relevé de la valeur efficace incidente grâce au trou de 20mm à l'intérieur du caisson permet de calculer une atténuation.

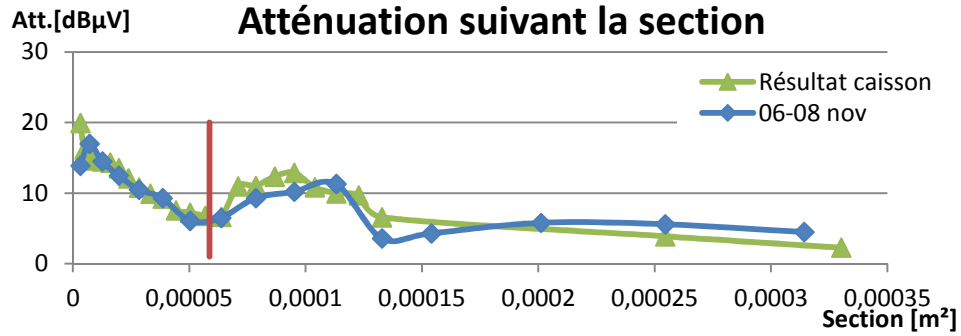

Figure 17 : Graphique de l'atténuation suivant la section

La chute d'intensité autour des 0,5 cm² s'explique par un phénomène de diffraction. Quand des fronts d'ondes de longueur d'onde « λ » rencontrent un diaphragme avec un percement de largeur « d » :

- Si $\lambda < d$ (fig. 18 : a), l'onde n'est pas perturbée par l'obstacle ;
- Si $\lambda \approx d$ (fig. 18 : b), les fronts d'onde deviennent courbes ;
- Si $\lambda > d$ (fig. 18 : c), une onde circulaire est alors générée derrière l'obstacle.

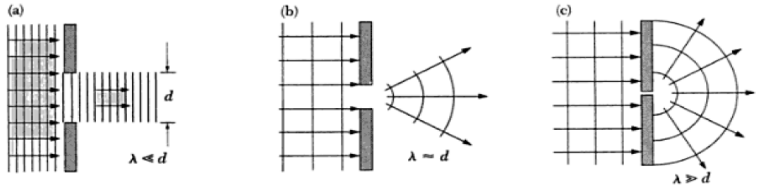

Figure 18 : Diffraction par un percement[1]

Comme la vitesse de propagation des ondes sonores dans l'air vaut 340,5 m/s et que la fréquence moyenne émise est de 39400Hz, la longueur d'onde du signal ultrasonore équivaut à : $\lambda = \frac{v}{f} = \frac{340{,}5\text{m/s}}{39400\text{ Hz}} = 8{,}642\text{mm}$.

La diminution d'atténuation correspond à une fuite dont le diamètre équivaut à la longueur d'onde moyenne des ondes incidentes (0,000058m²). Ce problème de diffraction ne peut être évité car une modification de la longueur d'onde provoquerait un déplacement du minimum observé.

Impact de l'épaisseur sur le débit et l'atténuation

Une augmentation de l'épaisseur du matériau va engendrer une augmentation des pertes de charges linéaires donc une diminution du débit. Par expérience, pour des trous de petits diamètres, le débit reste constant malgré l'augmentation de l'épaisseur du matériau. L'impact de l'épaisseur devient plus marqué avec l'augmentation du diamètre.

De même pour l'onde ultrasonore, le risque de réflexion et donc d'atténuation devient plus important. Une augmentation d'épaisseur provoque une croissance élevée de l'atténuation. Cette croissance est plus importante si le diamètre diminue.

De plus, on constate que l'atténuation ultrasonore croit de façon linéaire mais avec une oscillation du signal. Cette variation montre la présence du phénomène d'interférence, appelé battement, dans l'épaisseur du matériau.

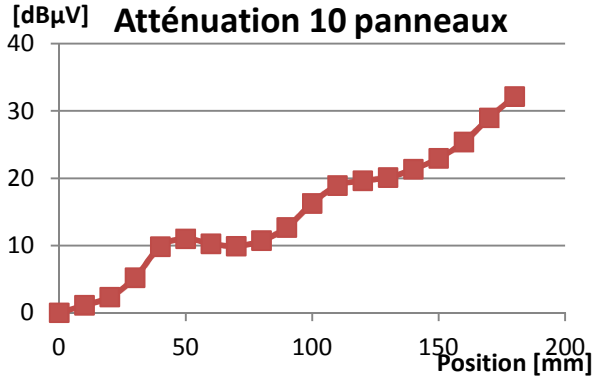

Figure 19 : Atténuation de dix panneaux

Le battement est dû à l'addition de deux signaux dont la résultante présente des ventres (zone d'intensité maximale) et des nœuds (zone d'intensité nulle). Cette expérience n'a pas permis de lier mathématiquement le débit à l'intensité ultrasonore mais elle montre un des problèmes physiques causés par le déplacement d'un son dans un tube.

Par contre, la croissance rapide de l'atténuation doit être testée sur une plus grande longueur. Si elle est vérifiée, le problème du mur anti-effraction (essai in situ à Malines) est alors confirmé.

La recherche d'une équation permettant de lier l'épaisseur du matériau à l'atténuation a conduit à la découverte de phénomènes d'interférence dans le matériau. Cette dernière expérience a été réalisée pour un diamètre de fuite élevé (20mm) et sur une courte distance.
Il faut maintenant établir l'allure générale (sans tenir compte des oscillations) des graphiques liant l'épaisseur à l'atténuation.
L'utilisation d'un tube en PVC d'un diamètre de 6mm a permis de faire varier facilement l'épaisseur du matériau sur de plus longues distances.

Figure 20 : Dispositif expérimental

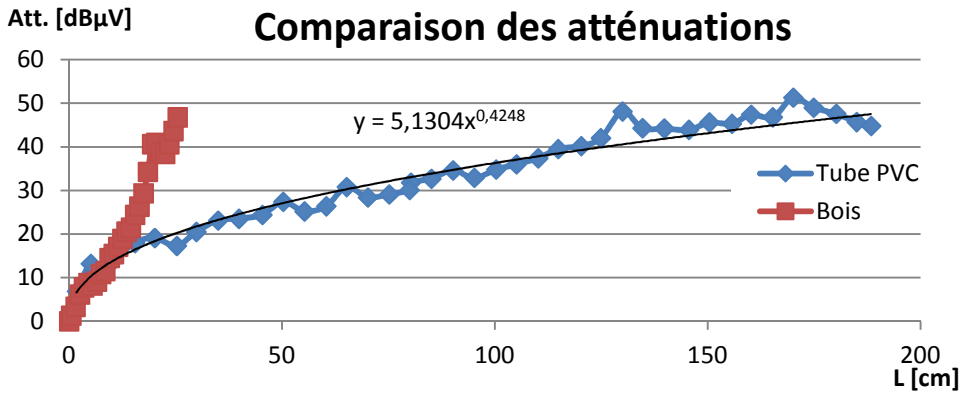

Figure 21 : Comparaison des atténuations dans le bois et le PVC

La courbe de type puissance traduit une croissance qui diminue avec la longueur du matériau. Le doublement de l'épaisseur pourrait donc avoir le même effet sur l'atténuation dans un matériau intact et dans une fuite.

Enfin, malgré la différence de diamètre (6mm pour le tube en PVC et 20mm pour le trou dans le bois) défavorable pour le PVC (moins d'onde ultrasonore passante), la très bonne réflexion du plastique aboutit à une atténuation beaucoup plus faible que pour le bois. L'impact du matériau sur l'atténuation ultrasonore est donc indéniable.

Impact du matériau sur le débit et l'atténuation

Pour conforter les essais avec le tube PVC, un relevé du débit et de l'atténuation en fonction de la section dans un panneau de mousse polyuréthane a été mené.

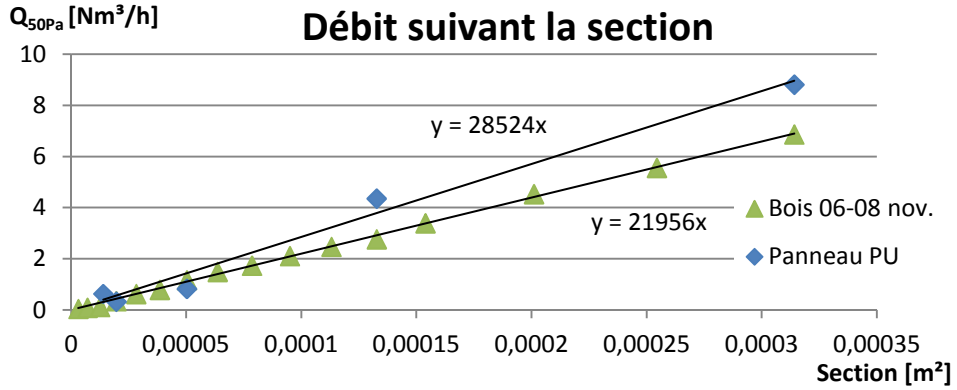

Figure 22 : Comparaison du débit PU et Bois

L'augmentation linéaire du débit correspond aux résultats obtenus avec le bois. Par contre, un décalage de la vitesse peut s'expliquer par l'état de surface interne des fuites.

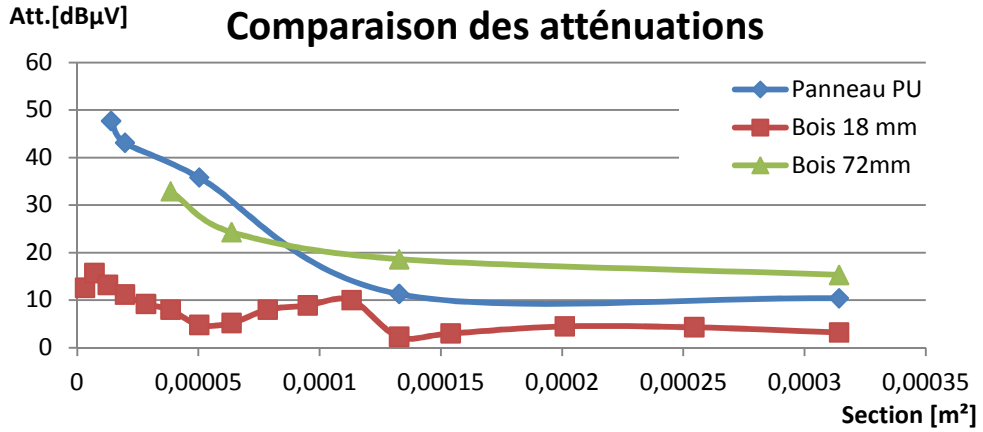

Figure 23 : Comparaison de l'atténuation PU et Bois

Quant à l'atténuation, les fuites de petits diamètres dans un panneau isolant en mousse polyuréthane sont indétectables en deçà de 5 mm (et donc non quantifiables). Une comparaison des résultats pour le bois avec une épaisseur de 18mm et de 72 mm montre pourtant une valeur d'intensité proche. Ce problème d'atténuation pourrait être plutôt un problème de réflexion dans la mousse autour de la fuite.

Comme pour la caméra thermique, une connaissance des matériaux éprouvés est primordiale pour tirer des conclusions correctes.

Au vu de tous les tests réalisés pour la quantification, la recherche d'équations liant chaque paramètre (section, épaisseur, matériaux, …) semble difficile. Plutôt que de se baser sur des calculs donnant le débit d'infiltration en fonction de l'atténuation mesurée, il serait plus judicieux d'établir des diagrammes expérimentaux en laboratoires pour chaque cas rencontré sur le terrain auxquels les mesures in situ seraient comparées.

4.6. Tests envisagés et questions en suspend

L'étude permettant d'aboutir à un protocole doit donc débuter par un relevé de tous les paramètres influençant les ultrasons et l'air. Mon stage n'a permis de relever que quelques-uns de ces facteurs d'influence, tout en vérifiant la possibilité d'utiliser cette méthode en conditions réelles. Un certain nombre de remarques, d'interrogations et de pistes à approfondir prouve la nécessité de continuer ces recherches avant de pouvoir établir un protocole réaliste, pragmatique et efficace : loi de masse en haute fréquence, superposition de matériaux, état de surface du matériau testé sur la réflexion et l'absorption, regroupement de plusieurs fuites, linéarité d'une fuite, impact des conditions ambiantes, quantification de fuites proches,… D'autres problèmes liés aux conditions de mesures ont aussi été observés : limites opératoires, sensibilités, caractéristiques physiques induisant l'interférence, problèmes d'unité ($dB\mu V \neq dB$), …

L'ensemble des tests envisagés et des problèmes rencontrés ne sont que des possibilités d'évolution et d'amélioration de cette technique de mesure d'étanchéité. La recherche doit donc continuer car les premiers tests prouvent le potentiel de cette méthode face aux procédés de mesure traditionnels.

5. Protocole expérimental

Suite aux expériences menées afin de déterminer les paramètres d'influence, un premier protocole peut être envisagé malgré le cadre restreint des mesures effectuées. Dans cette démarche encore fictive mais concevable, seules les données chiffrées ne sont pas représentatives des résultats expérimentaux (l'allure des courbes peut être considérée correcte).

Avant de réaliser les essais in situ, une étude de la paroi à tester permet de connaitre sa composition et l'épaisseur de chaque matériau constitutif. In situ, la recherche de fuites par ultrasons se déroule en trois phases.

Premièrement, il faut choisir l'émetteur le plus propice à la mesure et le placer aux meilleurs endroits :

- Dans le cas d'élément de façade, l'utilisation du SDT 8 est requise pour remplir la pièce d'ondes ultrasonores ;
- Si seule une paroi doit être testée, le SDT 200mW orienté vers l'élément, centré et à une distance d'au moins 3 mètres est suffisant.

Ensuite, l'utilisation de la canne flexible permet de balayer entièrement la zone de recherche afin de détecter la présence d'une fuite. Si un pic d'intensité est repéré, la quantification de cette fuite commence par le calcul de l'intensité incidente. Juste à côté de la fuite, sur un endroit sain de mêmes caractéristiques, mesurer l'intensité passante. Avec l'épaisseur et le type de matériau traversé, calculer l'intensité incidente grâce à :

$$I_{\text{incidente}} = \underbrace{I_{\text{passante (intact)}}}_{\text{mesurée}} + \underbrace{I_{\text{absorbée}}}_{\text{par diagramme (Fig. 24)}} \quad [\text{dB}\mu\text{V}]$$

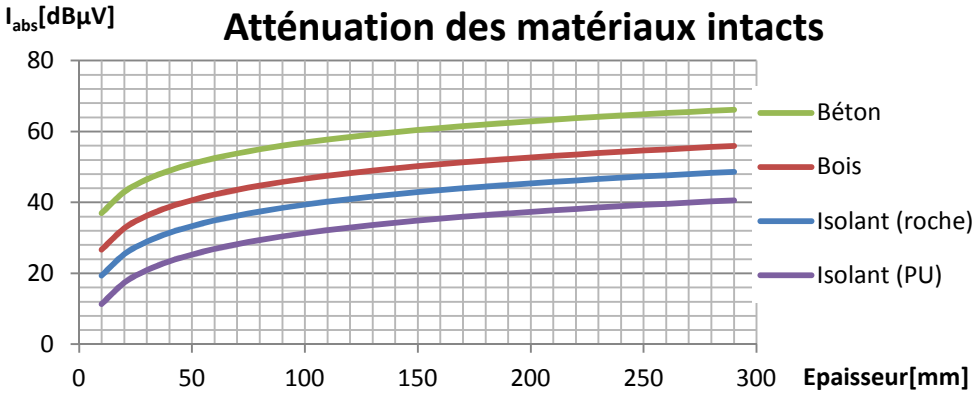

Figure 24 : Intensité absorbée selon l'épaisseur et le matériau

En cas de mur composé, l'addition des intensités absorbées conduit à l'absorption globale (hypothèse à vérifier par expérience).

Enfin, grâce à la mesure de l'intensité passante sur la fuite et à l'intensité incidente calculée, l'atténuation de la fuite et obtenue par la formule :

$$\text{Atténuation} = \underbrace{I_{\text{incidente}}}_{\text{calculée}} - \underbrace{I_{\text{passante (fuite)}}}_{\text{mesurée}} \quad [\text{dB}\mu\text{V}]$$

Avec les caractéristiques de la fuite (épaisseurs de la paroi, matériaux traversés, tortuosité, …), le choix d'une courbe donnera, pour chaque atténuation, la section qui permet de représenter au mieux la fuite :

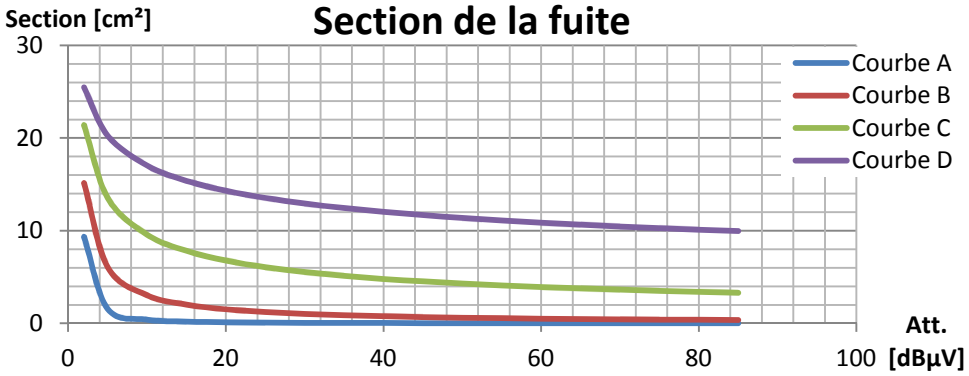

Figure 25 : Section de la fuite suivant l'atténuation qu'elle provoque

Cette démarche permettrait donc de quantifier toutes les fuites détectées par ultrasons. Mais cette méthode est encore utopique car plusieurs problèmes ont été volontairement oubliés : l'atténuation réelle en haute fréquence, l'addition des atténuations en cas de mur composé, l'impact de la diffraction selon la section, la détection en cas de fuite de faible diamètre, …

Mais connaitre les limites d'un système permet de cibler les cas où son utilisation est envisageable. Cette démarche, bien que possible, ne peut pas encore être appliquée pour la quantification car les recherches ne font que commencer.

6. Conclusions

Trois facteurs distincts ont incité le CSTC à débuter des recherches sur la détection des fuites par ultrasons.

Premièrement, les techniques actuelles de détection et de quantification présentent chacune des inconvénients : difficile à installer, dépendante des conditions atmosphériques, obligation d'avoir fermé complètement l'enveloppe du bâtiment, complexe, toxique, …

Deuxièmement, le problème de la détermination de l'étanchéité avant la fermeture complète de l'enveloppe du bâtiment a été posé au Comité Technique de menuiserie.

Enfin, l'utilisation des techniques de détection ultrasonore dans le milieu de l'industrie (étanchéité des cales de bateau, vérification du serrage des vitrages dans les voitures, contrôles des réseaux d'air comprimé, …) a pu être transposée dans le milieu de la construction par plusieurs entreprises spécialisées dans les ultrasons.

Après des recherches sur les techniques conventionnelles, les tests in situ m'ont permis d'établir ma démarche expérimentale. En effet, les premiers essais avec ultrasons menés en parallèle ont fait apparaître différents problèmes posés par cette technique. Les conditions du test, la détection sans ultrason et la complexité du parcours de la fuite mais surtout l'exploitation des valeurs chiffrées renvoyées par le récepteur ne sont qu'une faible partie des limites et des obstacles que j'ai pu évaluer durant mon stage.

Suite aux expériences menées afin de déterminer les paramètres d'influence, un premier protocole a été envisagé malgré le cadre restreint des mesures effectuées. Cette démarche pourrait être utilisée si les données sont améliorées. Malgré tout, les recherches entreprises durant mon stage contribuent au fondement de cette nouvelle méthode de quantification. Les 1500 mesures de débits et les 4000 mesures ultrasonores réalisées et analysées durant mon stage ne représentent qu'une faible partie des mesures qu'il faudrait effectuer.

7. Table des illustrations

(1) Bertrand E., Année académique 2013-2014, *Chapitre 5 : Lumière et lois de l'optique géométrique*, cours de Physique en 2BSI, HELHa-ISIC

(2) Definergie (page consultée le 14/12/2013), *Particuliers : Infiltrométrie* http://www.definergie.fr/particuliers.html

(3) SDT Internationnal, version 05-2008, *Multi-émetteur ultrasonore, Type SDT 8 et SDT 8 Multisetting, Manuel d'utilisation*, page 8.

(4) SDT Internationnal, version 2012, *SDT200-Mode d'emploi* page 7.

(5) Pack RT 2012 : Etude Thermique (page consultée le 07/10/2014), *Recherche des fuites d'air* https://packrt2012.wordpress.com/tag/anemometre/

8. Sources

[1] ASTM International, (reapproved) 2009, *E1186 – 03 : Standard Practices for Air Leakage Site Detection in Building Envelopes and Air Barrier Systems*, Etats – Unis

[2] COST (Europen Cooperation in Science and Technology), Building acoustics design, *Chapter 4: Acoustic design of lightweight timber frame constructions*, COST Action FP0702

[3] energie+ (page consultée le 23/12/2013), *Evaluer l'étanchéité à l'air* http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10337

[4] Look Solutions, 2013, *Mode d'emploi Tiny CX*, téléchargé sur : http://www.looksolutions.com/news/34/128/TINY-CX/d,produkte.html , 20pages

[5] Van Damme M., 2013, *Acoustique du Bâtiment, Chapitre 04 : Isolation aux bruits aériens*